

ВИКОРИСТАННЯ НАДЗВУКОВОГО ЕЖЕКТОРА В ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Надзвукові ежектори є перспективною технологією для підвищення ефективності холодильних та теплових систем. Вони використовують високошвидкісний первинний потік для створення низького тиску у змішувальній камері, що дозволяє всмоктувати вторинний потік без потреби у механічному компресорі. Це забезпечує зменшення енергоспоживання та підвищення екологічності систем охолодження. Основною перевагою надзвукових ежекторів є можливість використання низькопотенційних джерел тепла, таких як відпрацьовані гази, сонячна енергія та промислові теплоносії. Завдяки цьому їхнє застосування стає особливо актуальним у галузях, де важлива енергоефективність, зниження експлуатаційних витрат та екологічні аспекти. У даній роботі проведено аналіз наукових статей, присвячених дослідженню ефективності та оптимізації конструкції надзвукових ежекторів. Розглянуто вплив ключових параметрів, таких як геометрія змішувальної камери, форма дифузора, початковий тиск та температура робочого середовища. Використання числового моделювання (CFD) дозволяє оцінити вплив цих факторів на продуктивність системи та знайти оптимальні конфігурації для підвищення коефіцієнта захоплення. У дослідженні також розглядається застосування штучних нейронних мереж для прогнозування роботи надзвукових ежекторів, що дозволяє зменшити час обчислень та підвищити точність оптимізаційних розрахунків. Основні висновки даного дослідження підкреслюють, що вдосконалення конструкції, зокрема використання змінної геометрії змішувальної камери та дифузора, дозволяє значно покращити показники продуктивності. Перспективним напрямком подальших досліджень є розробка адаптивних ежекторних систем, які можуть автоматично змінювати параметри роботи залежно від зовнішніх умов.

Ключові слова: надзвуковий ежектор, охолоджувальні системи, надзвуковий струмень, енергоефективність, CFD-моделювання, холодоагент.

Вступ

Сучасні технології охолодження відіграють ключову роль у промисловості, транспорті, енергетиці та побутових умовах. В умовах глобального підвищення енерговитрат та екологічних обмежень зростає потреба у розробці енергоефективних систем охолодження, які мінімізують споживання електроенергії та скорочують використання традиційних холодильних агентів, що спричиняють парниковий ефект.

Одним із перспективних напрямків у цій галузі є використання надзвукових ежекторів, які дозволяють підвищити ефективність холодильних систем завдяки використанню теплової енергії замість електричної. В основі роботи такого пристрою лежить принцип газодинамічного всмоктування: енергія первинного потоку використовується для створення розрідження, що спричиняє захоплення вторинного потоку без необхідності механічного компресора.

Надзвукові ежектори мають значний потенціал застосування в охолоджувальних системах, зокрема у промислових установках, системах кондиціонування повітря, транспортних холодильниках, авіаційних та космічних системах. Основними перевагами цієї технології є:

-енергоефективність – використання низькопотенційного тепла (відпрацьованих газів, сонячної енергії, тепла промислових процесів).

-низькі експлуатаційні витрати – відсутність потреби в складних механічних компресорах.

-екологічність – зменшення використання холодоагентів та скорочення шкідливих викидів.

Попри всі переваги, надзвукові ежекторні системи ще не отримали широкого впровадження через низку технологічних проблем. Однією з основних є низький коефіцієнт продуктивності (КП) у порівнянні з традиційними парокомпресійними циклами. Це зумовлює необхідність оптимізації конструкції ежектора, зокрема його змішувальної камери, дифузора та первинного сопла.

У цій статті розглянуто сучасні дослідження у сфері надзвукових ежекторів, їхню ефективність у різних умовах роботи та можливості підвищення коефіцієнта захоплення. Виконано детальний огляд наукових матеріалів, які аналізують вплив конструктивних параметрів ежекторів на їхню продуктивність. Основна увага приділена методам оптимізації, включаючи CFD-моделювання та експериментальні дослідження.

Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є узагальнення результатів сучасних досліджень щодо використання надзвукових ежекторів у системах охолодження та оцінка перспектив їхнього впровадження в промисловість.

Основні завдання дослідження:

- аналіз принципу роботи надзвукових ежекторів та їхнього впливу на ефективність холодильних систем.
- дослідження сучасних методів оптимізації конструкції ежекторів, включаючи CFD-моделювання.
- огляд практичних застосувань надзвукових ежекторів у транспортних, промислових та комерційних системах охолодження.
- визначення перспективних напрямків подальших досліджень та можливостей покращення конструкції.

Очікується, що результати дослідження сприятимуть подальшому вдосконаленню та впровадженню цієї технології в реальні охолоджувальні установки, що дозволить значно підвищити їхню енергоефективність.

Матеріал і результати досліджень

Надзвуковий ежектор є пристроєм, який використовує високошвидкісний потік робочого середовища для створення області низького тиску та змішування з вторинним потоком. Його конструкція базується на газодинамічних процесах, що дозволяють підвищити ефективність систем охолодження без застосування механічних компресорів.

Надзвуковий ежектор складається з кількох ключових компонентів:

- первинне сопло (забезпечує прискорення робочого середовища до надзвукових швидкостей);
- камера змішування (місце, де відбувається змішування первинного (високошвидкісного) потоку з вторинним (низькошвидкісним) потоком);
- дифузор (забезпечує стиснення суміші потоків і підвищення тиску на виході);

Кожен із цих елементів виконує важливу роль у забезпеченні ефективної роботи ежектора та визначає його продуктивність. Принцип дії надзвукового ежектора базується на використанні кінетичної енергії первинного потоку для створення області розрідження, що спричиняє втягування вторинного потоку. Це відбувається за рахунок кількох фізичних механізмів:

1. Ефект затягування вторинного потоку – високошвидкісний первинний потік, виходячи з сопла, створює область низького тиску, що спричиняє всмоктування вторинного потоку з випарника або іншого джерела.

2. Ударні хвилі – при надзвуковій течії у змішувальній камері можуть утворюватися ударні хвилі, які впливають на ефективність змішування.

3. Компресія у дифузорі – після змішування потік сповільнюється у дифузорі, що приводить до підвищення тиску перед входом у конденсатор.

Робота надзвукового ежектора значною мірою залежить від його геометричних параметрів та умов експлуатації. Основні фактори, що впливають на його ефективність:

- діаметр та довжина змішувальної камери – оптимізація цього параметра покращує ефективність змішування;
- форма дифузора (правильний вибір геометрії дозволяє мінімізувати втрати тиску);
- первинний тиск (високий тиск первинного потоку покращує коефіцієнт захоплення);
- температура робочого середовища (впливає на швидкість звуку, що може змінювати ефективність системи);

Оптимізація цих параметрів є ключовим завданням при розробці ефективних систем охолодження на основі надзвукових ежекторів [1-10].

Дослідження [1], де розглядається вивчення впливу ефективності осесиметричного надзвукового ежектору на систему охолодження, показує, що зі збільшенням числа Маха первинного надзвукового потоку ефективність змішування знижується, що характеризується швидкістю поширення товщини зсувного шару (1), де M – число Маха первинного потоку.

$$\delta'_w = 0,085(0,25 + 0,75e^{-M}) \quad (1)$$

Залежність (1) запропонована на підставі чисельного розв'язку математичної задачі формування взаємодії надзвукового і дозвукового потоків. Модель дозволяє обчислювати всі ключові параметри потоку, такі як кількість затягнутого потоку, втрати тиску, ефективність змішування, теплообмін і роботу системи, виключаючи потребу в довільних параметрах. Результати розрахунків підкреслюють ключову проблему зниження ефективності змішування при збільшенні тиску ежектуючого газу і пропонують

перспективні рішення, за рахунок збільшення площі поверхні контакту надзвукових струменів з вторинним потоком, що досягається застосуванням декількох надзвукових сопел.

Запропонована модель дає можливість оптимізації конструкції за допомогою концепцій конструктивного підходу, який використовується в теплотехнічних обмінниках. Серед яких останнім часом пропонуються багатосоплові конструкції ежекторів та оптимізація контактних зон між потоками, що може значно підвищити ефективність надзвукових ежекторів.

Так, в роботі [2] запропоновано, для збільшення залучення вторинного потоку використання послідовно двох надзвукових сопел (рис.1), первинне – це звичайне осисеметричне сопло Лавалю і вторинного кільцевого сопла в камері змішування на деякій відстані від першого.

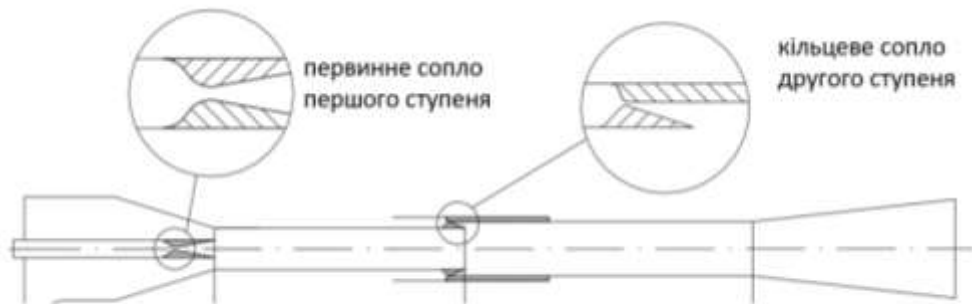


Рисунок 1 - Схема двох послідовних надзвукових сопел

Чисельні дослідження авторів показали взаємозалежність початкового тиску, кута розширення сопла, камери змішування та температури вторинного потоку для отримання оптимального коефіцієнту захоплення. При цьому було показано, що необхідно правильно моделювати теплофізичні властивості холодоагента, оскільки зміна фазового стану пароутворення впливає на розподіл швидкостей в трансзвуковій зоні потоку. Так малопотужний прототип системи (5кВт) продемонстрував суттєву нестабільність потоку через конденсацію пари і відповідний низький коефіцієнт продуктивності. При збільшенні потужності, експериментальні результати майже співпадають з теоретичними, що свідчить про майже миттєве конденсування пари в надзвуковому струмені, і як результат показує кращі результати продуктивності. У нових дизайнах пристроїв були скореговані геометричні параметри камери змішування і дифузору, що підвищило коефіцієнт продуктивності до значення 0.23, при температурах випарника 5°C і генератора 100°C.

Результати роботи показують перспективність охолоджувальних систем на основі багатосоплових надзвукових ежекторів з парою через їхню низьку вартість і екологічність, але залишається невизначеним вплив співвідношення тисків ежектуючого і ежектуюемого газів для підвищення коефіцієнта продуктивності.

Застосування надзвукового ежектора в системах охолодження також аналізується в роботі [3], де на підставі теоретичного аналізу законів збереження, руху, теплопровідного стислого в'язкого газу в одновимірній постановці отримані термодинамічні співвідношення параметрів ежектора охолоджувального циклу. Враховано для оцінки коефіцієнту ефективності системи значення компонентів тертя та змішування. Наведено рівняння для визначення швидкостей первинного (2) і вторинного потоку (3), через відповідні значення ентальпії:

$$U_{p.ne} = \sqrt{2\pi(h_{p.ni} + h_{p.ne.is})}; \quad (2),$$

де $h_{p.ni}$ - питома ентальпія первинного потоку перед входом в сопло; $h_{p.ne.is}$ - питома ентальпія первинного потоку (при ізотропічному процесі).

$$U_{s.ne} = \sqrt{2\pi(h_s + h_{s.ne})}; \quad (3),$$

де h_s - питома ентальпія вторинного потоку на вході в систему; $h_{s.ne}$ - питома ентальпія вторинного потоку на виході з сопла.

Проведений ексерго-економічний аналіз дозволяє оцінити фінансову доцільність застосування системи, включаючи капітальні та експлуатаційні витрати. Використання ежектора в охолоджувальних

системах дає змогу утилізувати відпрацьоване тепло та підвищити ефективність процесу, забезпечуючи баланс між енергоефективністю та фінансовими витратами.

Але запропонована система з дозвуковим ежектором, з відносно великим коефіцієнтом ефективності, але з дуже малою витратою, що не може конкурувати з надзвуковим ежектором в системах де потрібні великі витрати.

Дослідження [4], де оптимізується геометрія змішувальної камери в надзвуковому ежекторі для підвищення коефіцієнту ефективності систем охолодження. Запропоновано вигнуту змішувальну камеру замість традиційної циліндричної. Дослідження проводилось методом числового моделювання (CFD), де розглядалися декілька варіантів профілю змішувальної камери з різним радіусом кривизни при фіксованих параметрах сопла, дифузора та горловини. Параметр оцінки ефективності визначається через коефіцієнт захоплення, (відношення витрати вторинного потоку до витрати первинного). Результати свідчать, що вигнута форма (на рис. 2 представлено схематичне зображення ежектора з вигнутою змішувальною камерою) може значно підвищити цей показник. Наприклад, при температурі котла 170°C коефіцієнт захоплення зростає на 36%, а критичний зворотний тиск знижується порівняно з традиційним дизайном.

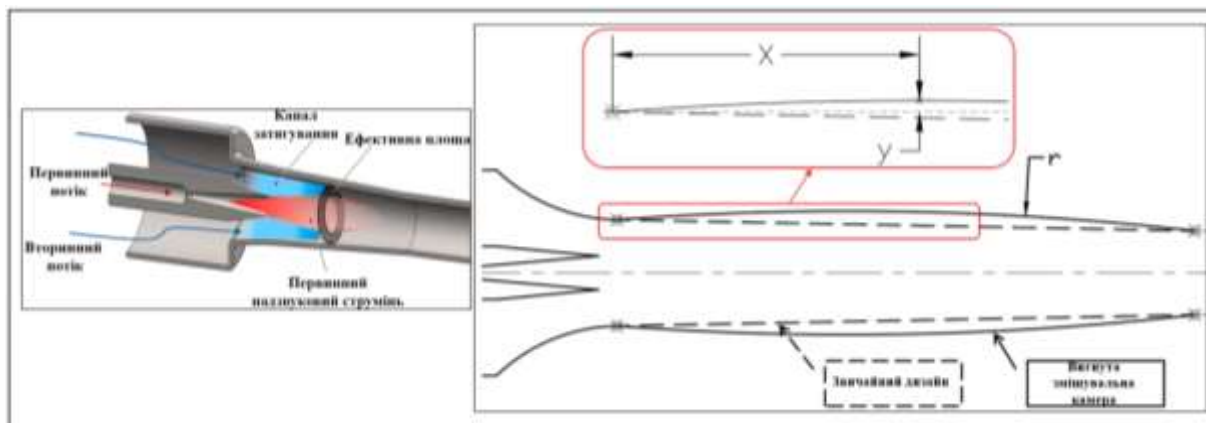


Рисунок 2 - Схематичне зображення ежектора з вигнутою змішувальною камерою

Коефіцієнт захоплення для усіх досліджуваних варіацій ежекторів з вигнутою камерою змішування більший ніж для ежекторів з традиційним дизайном. Для різних робочих температур існує оптимальний радіус кривизни (наприклад, ejector Mix40-3 ($r=1420\text{mm}$) для 130°C та Mix100-3($r=622\text{mm}$) для 170°C), що демонструє важливість точного вибору геометричних параметрів. Підвищення температури котла закономірно зменшує коефіцієнт захоплення, що характерно для надзвукових ежекторів. Детальний аналіз полів течії виявив, що модифікація змішувальної камери впливає на місце утворення ударної хвилі (choking position) у потоці, а зміщення зони стиску вгору за потоком поліпшує змішування первинного і вторинного потоків. Числове моделювання підтвердило, що оптимізація геометрії збільшує ефективну площу потоку і підвищує продуктивність. З економічної точки зору, це відкриває можливість використання нижчих температур джерела тепла і зниження експлуатаційних витрат. Загалом робота А. Muzabeg та інших підкреслює важливість залежності форми камери змішування від параметрів первинного надзвукового потоку. Але жодного посилення на експериментальні роботи немає, а чисельне значення чисел Маха (майже 7) для досліджуваного діапазону тиску і температур дуже сумнівні.

Матеріал роботи [5] показує важливість і перспективність дослідження використання ежектора для покращення роботи абсорбційної охолоджувальної системи (RACS) Robur®.

Основною метою дослідження є підвищення коефіцієнта продуктивності (КП) шляхом інтеграції парового ежектора між генератором і конденсатором холодильної установки, схема холодильної системи після додавання ежектора представлена на рис. 3.

Запропоновано моделювання системи охолодження на основі балансу маси та енергії, з урахуванням теплообміну і випарювання, для стислого політропного газу. Коефіцієнт ефективності системи охолодження визначається:

$$\text{COP} = \frac{Q_l}{Q_g + W_{in}}; \quad (4)$$

де, Q_l – загальна теплова потужність системи; Q_g – теплова потужність випарювання; W_{in} – потужність на вході в систему (work rate inlet).

Аналіз моделі ежектора проводиться з урахуванням тисків P_{pf} - первинного, P_{sf} - вторинного потоків, а також P_5 - тиску на виході із ежектора.

Показано, що додавання ежектора дозволило підвищити КП на 70.6% у порівнянні зі стандартною конфігурацією без ежектора (рис.4) і знизити коефіцієнт циркуляції (CR) на 41%, також показано вплив залежності коефіцієнту ефективності системи від температури навколишнього середовища, де T_g – температура генератора, T_{amb} – температура навколишнього середовища, COP – коефіцієнт продуктивності.

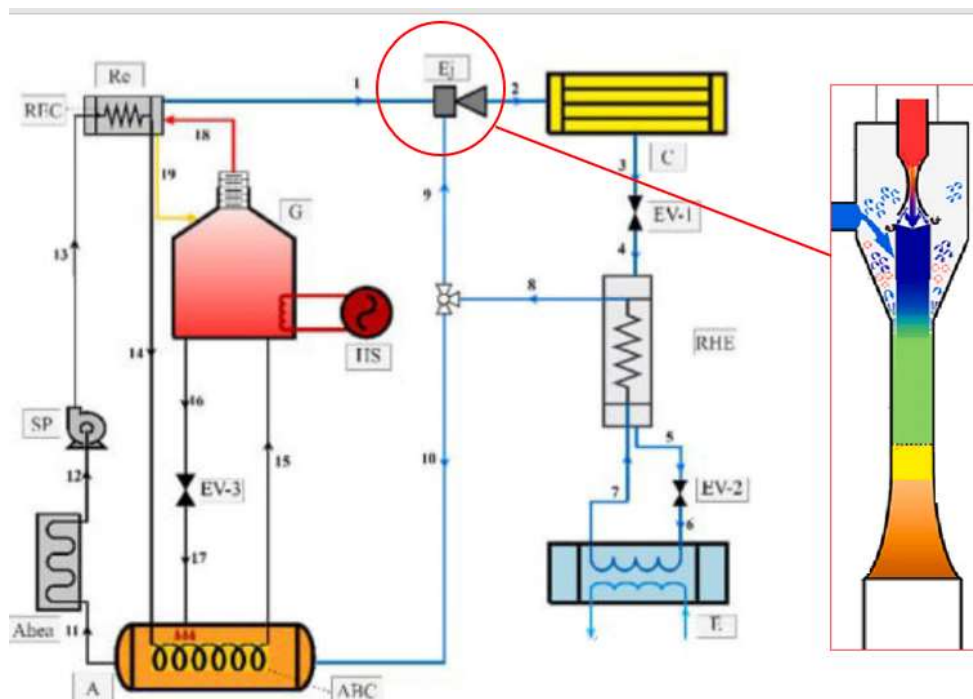


Рисунок 3 - Схема абсорбційної системи охолодження Rovig® після додавання ежектора:
 REC – нагрівач; SP – насос; Re – випрямляч; Ev- розширювальний клапан; C- конденсатор;
 IIS – зовнішнє джерело тепла; G – генератор; E – випарник; Ahea – теплообмінник абсорбер-повітря;
 A – абсорбер; ABC – нагрівач змійовик; RHE – центральний теплообмінник хладагенту;
 Ej – ежектор

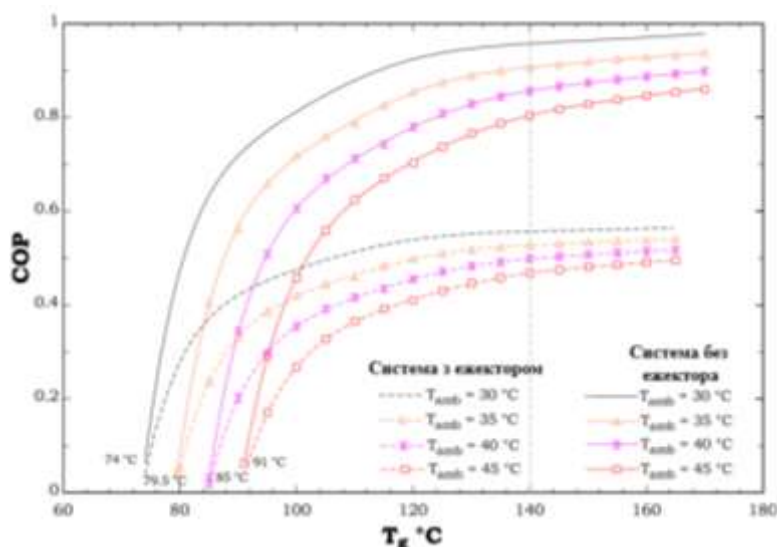


Рисунок 4 - Графік залежності коефіцієнту ефективності системи від температури навколишнього середовища

Впровадження ежектору демонструє значне підвищення продуктивності саме між генератором і конденсатором, де високотемпературний і високий тиск парового потоку захоплює низькотемпературний потік, утворюючи змішаний потік середнього тиску. У роботі деталізовано механізм роботи ежектора,

включаючи формування ударної хвилі в змішувальній трубі, де тиск і температура різко зростають, а далі потік переходить у субзвуковий режим. Виявлено, що вплив зменшення діаметра горловини і збільшення діаметра змішувальної камери підвищують продуктивність, проте лише в межах умов, коли ежектор працює в критичному режимі.

Аналіз роботи [6], спираючись на CFD та експеримент, показує вплив геометрії сопла та його розташування на продуктивність осесиметричного надзвукового ежектора. Виявлено, що відповідне змішування виходу надзвукового сопла у камеру змішування може призводити до рециркуляції всередині змішувальної камери і зменшенні витрати вторинного потоку. На рис. 5 демонструється відповідна рециркуляційна зона. Формування зон рециркуляції залежить від багатьох параметрів, таких як кут сходження зони змішування, первинного та вторинного тиску, а також як було зазначено вище, від розташування вихідного отвору сопла.

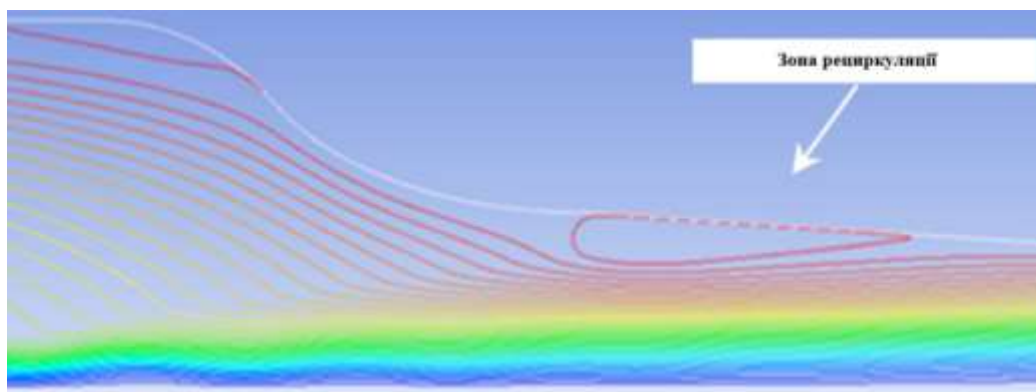


Рисунок 5 - Формування області рециркуляції в камері змішування

Відношення діаметру камери змішування до діаметру сопла при відповідному відношенні тисків первинного і другого потоків визначають інтенсивність змішування і коефіцієнт витрат. Результати проведеного моделювання збігається з експериментом, підтверджуючи, що оптимальне налаштування параметрів мінімізує утворення рециркуляції та підвищує коефіцієнт захоплення.

У роботі [7] аналізується робота надзвукового ежектора з реальними газами (R141b і R245fa) в системі охолодження. Модель була апробована на геометріях та операційних умовах, що відповідають експериментальним дослідженням, і результати моделювання добре співвідносяться з експериментальними даними, з максимальною різницею $\sim 10\%$ за всіма розглянутими умовами.

Після валідації CFD-моделі було проведено дослідження продуктивності експериментального ежектора SETC-A при різних операційних умовах. Схематичне зображення надзвукового ежектора представлено на рис.6, геометричні характеристики наведені в табл. 1. При вивченні впливу трьох геометричних параметрів на ефективність ежектора: положення виходу сопла, довжина змішувальної камери та діаметр входу вторинного потоку, в широкому діапазоні операційних умов показано що всі ці три параметри мають невеликий вплив на продуктивність ежектора.

З трьох геометричних параметрів найбільший вплив на коефіцієнт захоплення має положення виходу сопла, однак варіація коефіцієнта захоплення не перевищує 4% , що має порядок похибки. Також відмічається залежність критичного тиску в конденсаторі від довжини змішувальної камери (L_3), однак і цей вплив невеликий, з варіацією між мінімальними і максимальними значеннями, що становить лише 5% .

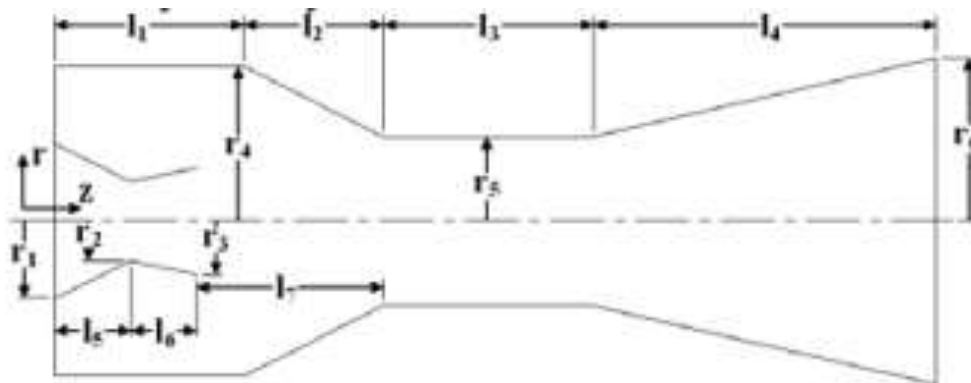


Рисунок 6 - Схематичне зображення надзвукового ежектора

Таблиця 1

Довжина (l), мм							Радіус (r), мм					
l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆
40	32.24	35.36	56.94	18.32	18.32	35.6	6.65	1.32	2.25	11.55	3.49	7.04

У роботі [8] також досліджується вплив використання надзвукових ежекторів у холодильних установках (зокрема, для кондиціонування повітря), а також можливості оптимізації умов роботи ежектора для підвищення ефективності охолоджувальної системи в цілому. Моделювання виконувалась за допомогою ANSYS Fluent 14.5, методом RANS та із застосуванням моделі турбулентності SST k- ω . У роботі порівнюються результати моделювання з використанням холодоагенту R134a (із реальними термодинамічними властивостями з NIST-REFPROP) та результати моделювання ідеального газу.

При моделюванні ідеального газу коефіцієнт захоплення і коефіцієнт продуктивності становлять 0,302 та 0,272 відповідно. При моделюванні системи з використанням властивостей реального холодоагенту R134a коефіцієнт захоплення і коефіцієнт продуктивності становлять 0,264 та 0,238 відповідно. Порівняння засвідчило, що врахування реальних властивостей робочого середовища дає більш точне передбачення коефіцієнта захоплення та коефіцієнта продуктивності, ніж модель ідеального газу, різниця між отриманими кінцевими показниками продуктивності становить ~ 12 %.

Додатково у даному дослідженні автори акцентують увагу, що для підвищення системи охолодження в цілому, важливо правильно підбирати геометричні параметри ежектора, щоб отримати розрахункове надзвукове сопло для відповідних значень тиску і температури випарника і конденсатора. Так, під час моделювання були визначені геометричні параметри ежектора, (табл. 2) які працюють у майже оптимальному режимі при заданих температурах (температура випарника - 10°C; температура конденсатора: ~ 40°C; температура генератора - 95°C).

Таблиця 2

Вхідний діаметр сопла	10 мм
Вихідний діаметр сопла	3.65 мм
Кут сходження сопла	60°
Кут розходження сопла	10°
Відстань від сопла до камери змішування	5 мм
Діаметр камери змішування	5.1 мм
Довжина камери змішування	39 мм
Вихідний діаметр дифузору	13.84 мм
Довжина дифузору	50 мм
Кут дифузору	5°
Загальна довжина ежектора	108.24 мм
Відношення довжини камери змішування до діаметра	7.6

Остаточне підтвердження результатів отриманих в роботі [8] потребує експериментів, але загалом можна сказати, що для дослідження впливу геометрії надзвукового ежектора на його продуктивність доцільно і допустимо використовувати ідеальний газ під час моделювання, але для отримання реальних значень коефіцієнтів продуктивності реальної охолоджувальної системи необхідно застосовувати реальні властивості холодоагентів.

Подальші результати роботи [9] висвітлюють числове моделювання характеристик потоку всередині надзвукового парового ежектора, зокрема оптимальну конструкцію сопел. Досліджується три форми сопел: пряме, опукле (convex) та увігнуте (concave). На рис. 7 показано розподіл чисел Маха для різних конструкцій сопел.

Опукле демонструє найбільший коефіцієнт захоплення (~0.4), однак збільшує турбулентність і втрати через ударні хвилі. Увігнуте забезпечує стабільніший потік і краще відновлення тиску, а пряме залишається збалансованим компромісом. Це черговий раз підкреслює важливість правильного підбору геометричних характеристик надзвукового ежектора при застосуванні його в охолоджувальних системах. Це дослідження відкриває додаткові можливості для підвищення енергоефективності охолоджувальних та абсорбційних систем, що працюють на надзвукових ежекторах, шляхом застосування різних форм сопел, для досягнення оптимальних параметрів геометрії надзвукових ежекторів.

Насамкінець, методичні підходи у роботі [10] пропонують нову модель для швидкого прогнозування роботи надзвукових ежекторів на основі штучних нейронних мереж з алгоритмом зворотного поширення помилки, доповненим оптимізацією рою частинок. Мета — частково замінити дорогі CFD-розрахунки, визначаючи коефіцієнт захоплення, розподіл тиску та швидкість потоку. Мережу навчають на результатах числового моделювання та експериментальних даних, що скорочує

обчислювальні витрати при високій точності. Середня похибка не перевищує 4%, порівняно з моделюванням. Розроблений метод оцінювали на різних робочих середовищах, включно з фреонами та водою, що підтвердило його універсальність. Застосування нейронних мереж дозволяє швидко знаходити оптимальні параметри, підвищуючи енергоефективність і забезпечуючи гнучке керування у реальному часі.

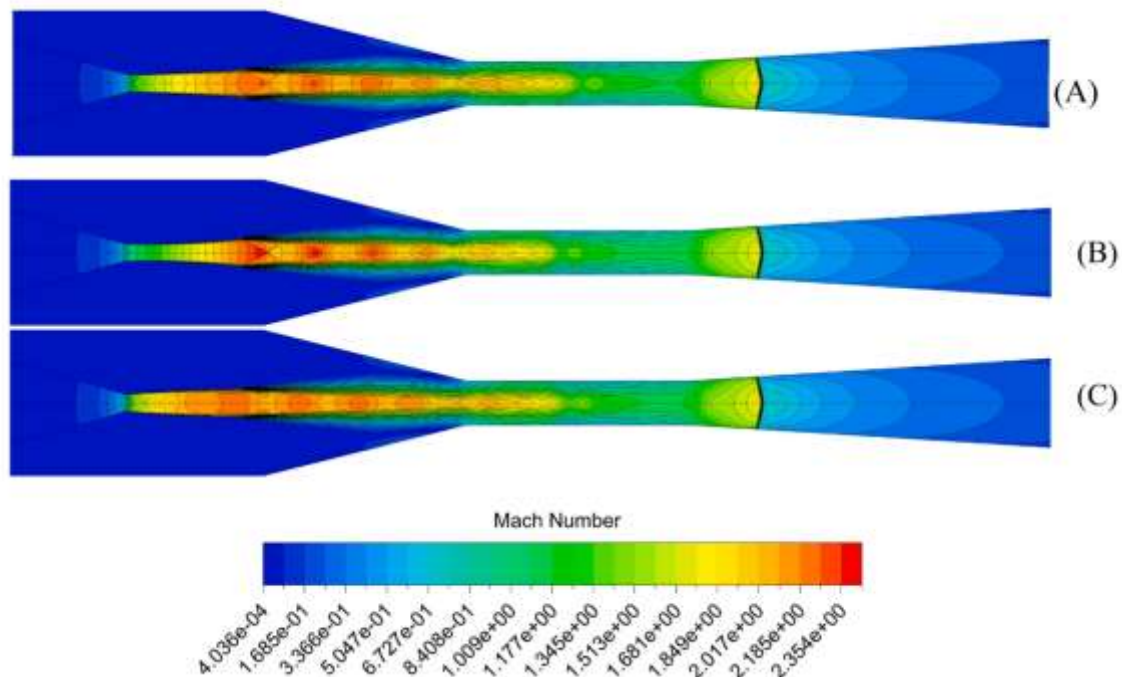


Рисунок 7 - Розподіл чисел Маха для: А – прямого сопла, В – вигнутого сопла, С – увігнутого сопла.

Впровадження такого підходу у проектуванні холодильних системи з надзвуковими ежекторами суттєво зменшує часові та фінансові витрати на проектування, що в свою прискорює розвиток подібних систем охолодження.

Підвищення ефективності надзвукових ежекторів є однією з головних задач у їхньому розвитку та застосуванні в системах охолодження. Важливими факторами, що впливають на продуктивність ежектора, є геометричні параметри, умови експлуатації та оптимізаційні методи, що використовуються для покращення його характеристик.

Різні дослідження [1-9] демонструють, що правильний підбір конструктивних елементів ежектора дозволяє значно підвищити його ефективність. Основні напрямки оптимізації включають: змінну геометрію сопла (можливість адаптації розміру первинного сопла дозволяє регулювати швидкість і тиск потоку, що покращує коефіцієнт захоплення вторинного потоку), оптимізацію форми змішувальної камери (згідно з дослідженнями [4], [9], використання вигнутої камери покращує ефективність змішування потоків і підвищує загальний коефіцієнт продуктивності), покращення форма дифузора (подовжені та плавні дифузори знижують втрати тиску, що збільшує ефективність компресії вихідного потоку).

Продуктивність надзвукового ежектора залежить не лише від його конструкції, але й від зовнішніх умов, у яких він експлуатується. Ключові фактори, що впливають на ефективність роботи:

- температура первинного потоку (підвищення температури первинного потоку може суттєво збільшити коефіцієнт захоплення);
- тиск вторинного потоку (стабільний низький тиск у вторинному контурі забезпечує кращі умови для всмоктування потоку в змішувальну камеру);
- вплив навколишнього середовища (зміни атмосферного тиску та температури впливають на ефективність роботи ежекторів, особливо в мобільних застосуваннях, таких як транспортні охолоджувальні системи).

Окрім CFD-моделювання, у сучасних дослідженнях застосовуються методи машинного навчання для оптимізації параметрів ежекторів [10]. Використання штучних нейронних мереж та алгоритмів рою частинок дозволяє знаходити найкращі комбінації конструктивних параметрів та прогнозувати продуктивність системи в режимі реального часу.

Оптимізація конструкції надзвукових ежекторів є ключовим напрямком для підвищення ефективності систем охолодження.

Застосування надзвукових ежекторів у різних сферах промисловості та енергетики відкриває нові можливості для підвищення ефективності та зменшення енергетичних витрат [1-10]. Завдяки здатності працювати без механічних компресорів та використовувати низькопотенційну теплову енергію, ці пристрої знаходять своє місце в різних галузях. Надзвукові ежектори є універсальними пристроями, які можуть бути інтегровані у широкий спектр енергетичних та охолоджувальних технологій. Їх впровадження сприяє зниженню енергетичних витрат, покращенню екологічних характеристик та підвищенню загальної ефективності теплових систем. Подальший розвиток технології дозволить розширити сфери їх застосування та адаптувати до специфічних умов роботи.

Висновки

На основі аналізу останніх наукових статей можна зробити висновок, що використання надзвукових ежекторів у системах охолодження є перспективним напрямком для підвищення ефективності та зниження енергетичних витрат. Результати досліджень підтверджують, що оптимізація конструкції ежектора дозволяє покращити його продуктивність.

Ефективність надзвукових ежекторів значною мірою залежить від їхньої конструкції. Оптимізація параметрів змішувальної камери, форми дифузора та первинного сопла дозволяє підвищити коефіцієнт захоплення та продуктивність системи.

Використання числового моделювання (CFD) є ключовим підходом до вдосконалення конструкції. CFD-дослідження показали, що правильно спроєктований дифузор і змішувальна камера можуть суттєво покращити енергоефективність ежекторних холодильних систем. Експериментальні дослідження підтверджують високу кореляцію між числовими моделями та реальними результатами. Оптимізація геометрії та правильний вибір параметрів роботи дозволяють досягати високого рівня продуктивності та стабільності системи.

Впровадження інтелектуальних алгоритмів управління та оптимізації (штучні нейронні мережі, алгоритми рою частинок) може значно знизити час на пошук оптимальних параметрів надзвукових ежекторів.

Перспективи подальших досліджень включають розробку змінної геометрії надзвукових ежекторів, інтеграцію з відновлюваними джерелами енергії та створення автоматизованих адаптивних систем.

Список використаної літератури

1. Grazzini G., Mazzelli F., Milazzo A. CONSTRUCTAL DESIGN OF THE MIXING ZONE INSIDE A SUPERSONIC EJECTOR, INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND TECHNOLOGY Volume 34 (2016), Special Issue 1, с. S109-S118 <http://dx.doi.org/10.18280/ijht.34S114>
2. Milazzo A., Rocchetti A., Eames I. Theoretical and experimental activity on Ejector Refrigeration, Energy Convers. Manag. 45 (1245-1254) (2014), <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.130>
3. Golafshani S.R., Houshfa E. Integrated ejector cooling, PVT, and MGT system for smart building applications: An exergy and technoeconomic optimization, Energy Convers. Manag. 66 (105752) (2025), <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105752>
4. Muzaber A., Bassmaji N., Kaddah A. A new mixing chamber geometry design for supersonic ejector performance optimization using computational fluid dynamics, Energy Convers. Manag. 25 (101047) (2025), <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.101047>
5. Mukhtar H.K., Ghani S. Improving the performance of a commercial absorption cooling system by using ejector: A theoretical study, Energy Convers. Manag. 45 (102967) (2023), <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102967>
6. Zohbi B.E., Bukharin N., Assoum H.H. Investigation of the effects of the jet nozzle geometry and location on the performance of supersonic fluid ejectors, Energy Convers. Manag. 8 (228-233) (2022), <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2022.01.029>
7. D. Scott., Z. Aidoun., O. Bellache., M. Ouzzane., "CFD Simulations of a Supersonic Ejector for Use in Refrigeration Applications" (2008). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 927. <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/927>
8. Honra J., Berana M., Danao L. CFD Analysis of Supersonic Ejector in Ejector Refrigeration System for Air Conditioning Application, Proceedings of the World Congress on Engineering 2017 Vol II WCE 2017, July 5-7, 2017, London, U.K.
9. Mukhtar H.K., Ghani S., Fadlalla A. Numerical investigation of the flow characteristics inside a supersonic vapor ejector, Energy Convers. Manag. 24 (100912) (2024), <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100912>
10. Zhu H., Liu J., Yu J., Yang P. Artificial neural network-based predictive model for supersonic ejector in refrigeration system, Energy Convers. Manag. 49 (103313) (2023), <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103313>

G. Voropaiev¹, Dr. Sc. (Phis.-Math.), Prof., ORCID 0009-0001-8178-9028

N. Kolodii¹, PhD student, ORCID 0009-0008-8332-6917

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

USE OF SUPERSONIC EJECTOR IN COOLING SYSTEMS

Supersonic ejectors are a promising technology for improving the efficiency of refrigeration and heating systems. They use a high-speed primary stream to create a low pressure in the mixing chamber, which allows the secondary stream to be sucked in without the need for a mechanical compressor. This reduces energy consumption and increases the environmental friendliness of cooling systems. The main advantage of supersonic ejectors is the ability to use low-potential heat sources, such as exhaust gases, solar energy, and industrial coolants. This makes their use especially relevant in industries where energy efficiency, reduced operating costs, and environmental aspects are important. This paper analyzes scientific articles on the efficiency and design optimization of supersonic ejectors. The influence of key parameters such as mixing chamber geometry, diffuser shape, initial pressure, and working medium temperature is considered. The use of numerical modeling (CFD) allows us to evaluate the impact of these factors on system performance and find optimal configurations to increase the capture rate. The study also considers the use of artificial neural networks to predict the operation of supersonic ejectors, which reduces computation time and increases the accuracy of optimization calculations. The main conclusions of this study emphasize that design improvements, such as the use of variable geometry of the mixing chamber and diffuser, can significantly improve performance. A promising area for further research is the development of adaptive ejector systems that can automatically change the operating parameters depending on external conditions.

Keywords: *supersonic ejector, cooling systems, supersonic jet, energy efficiency, CFD modeling, refrigerant*

References

1. G. Grazzini, F. Mazzelli, A. Milazzo, CONSTRUCTAL DESIGN OF THE MIXING ZONE INSIDE A SUPERSONIC EJECTOR, INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND TECHNOLOGY Volume 34 (2016), Special Issue 1, c. S109-S118 <http://dx.doi.org/10.18280/ijht.34S114>
2. A. Milazzo, A. Rocchetti, I. Eames, Theoretical and experimental activity on Ejector Refrigeration, Energy Convers. Manag. 45 (1245-1254) (2014), <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.130>
3. S.R. Golafshani, E. Houshfa, Integrated ejector cooling, PVT, and MGT system for smart building applications: An exergy and technoeconomic optimization, Energy Convers. Manag. 66 (105752) (2025), <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105752>
4. A. Muzaber, N. Bassmaji, A. Kaddah, A new mixing chamber geometry design for supersonic ejector performance optimization using computational fluid dynamics, Energy Convers. Manag. 25 (101047) (2025), <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.101047>
5. H.K. Mukhtar, S. Ghani, Improving the performance of a commercial absorption cooling system by using ejector: A theoretical study, Energy Convers. Manag. 45 (102967) (2023), <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102967>
6. B.E. Zohbi, N. Bukharin, H.H. Assoum, Investigation of the effects of the jet nozzle geometry and location on the performance of supersonic fluid ejectors, Energy Convers. Manag. 8 (228-233) (2022), <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2022.01.029>
7. Scott, David; Aidoun, Zine; Bellache, Omar; and Ouzzane, Mohamed, "CFD Simulations of a Supersonic Ejector for Use in Refrigeration Applications" (2008). International Refrigeration and Air Conditioning Conference. Paper 927. <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/927>
8. J. Honra, M. Berana, L. Danao, CFD Analysis of Supersonic Ejector in Ejector Refrigeration System for Air Conditioning Application, Proceedings of the World Congress on Engineering 2017 Vol II WCE 2017, July 5-7, 2017, London, U.K.
9. H.K. Mukhtar, S. Ghani, A. Fadlalla, Numerical investigation of the flow characteristics inside a supersonic vapor ejector, Energy Convers. Manag. 24 (100912) (2024), <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.100912>
10. H. Zhu, J. Liu, J. Yu, P. Yang, Artificial neural network-based predictive model for supersonic ejector in refrigeration system, Energy Convers. Manag. 49 (103313) (2023), <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.103313>

Надійшла: 03.03.2025

Received: 03.03.2025